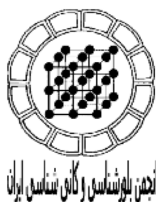
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و نهم، شمارهٔ چهارم، زمستان ۱۴۰۰، از صفحهٔ ۸۷۱ تا ۸۸۸



زمین‌شناسی، ویژگی‌های فیزیکی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی بنتونیت اشکفتوک (شمال غرب بیرجند)

ملیحه نخعی*[۱]، سید سعید محمدی[۲]

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱/۱۶، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۳/۸)

چکیده: معدن بنتونیت اشکفتوک در شمال غرب بیرجند و در بخش شرقی قطعه لوت قرار دارد. این بنتونیت فراورده دگرسانی گدازه‌های آندزیتی و توف‌های همراه به سن ترشیری است. ویژگی‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند که سنگ مادر بنتونیت‌ها دارای ترکیب آندزیتی و نمونه‌های بنتونیت دارای ترکیب آندزیت تا داسیت- ریوداسیت هستند. سری ماگمایی همه نمونه‌های بررسی‌شده از نوع آهکی‌قلیایی است. بر اساس نتایج پراش پرتوی ایکس (XRD)، کانی‌های اصلی سازنده بنتونیت‌ها شامل مونتموریونیت، آنورتیت، کریستوبالیت و کوارتز همراه با مقادیر کمتر ایلیت، مسکوویت، کائولینیت، میکروکلین و دولومیت هستند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی تهیه شده از نمونه‌های بنتونیت نشان می‌دهد که اسمکتیت (مونتموریونیت) فراوان‌ترین کانی در این نمونه‌هاست که با ریخت‌شناسی ورقه‌ای با لبه‌های ناهموار، لانه‌زنبوری و دانه‌ذرتی مشخص می‌شود. بر پایه نتایج طیف‌سنجی پراکنش انرژی پرتوی ایکس (EDX) نیز کانی غالب سازنده بنتونیت‌ها از نوع مونتموریونیت سدیم –کلسیم‌دار است و بر این اساس، بنتونیت اشکفتوک در رده بنتونیت‌های نوع وایومینگ قرار دارد. بررسی تغییرات جرم عناصر اصلی و کمیاب بنتونیت‌های اشکفتوک بیانگر کاهیدگی اجزایی چونK_2O، Na_2O، CaO، MgO، MnO و عناصر سنگ‌دوست بزرگ‌یون مانند Ba، Rb، Sr و غنی‌شدگی اجزایی چون SiO_2، Al_2O_3 و Fe_2O_3 است.

واژه‌های کلیدی: *مونتموریونیت؛ تغییر جرم؛ اشکفتوک؛ لوت.*

مقدمه

بنتونیت نامی است که برای سنگ‌های آرژیلی دارای مونتموریونیت به عنوان یک کانی رسی از گروه اسمکتیت بکار می‌رود [۱-۴]. بنتونیت‌های اسمکتیتی اغلب دارای کلسیم و سدیم هستند، در حالیکه بنتونیت‌های پتاسیم‌دار اسمکتیت ندارند و اغلب در سنگ‌های رسوبی دوران فانروزوئیک دیده می‌شوند [۵-۷]. بنتونیت بیشتر از دگرسانی سنگ‌های آذرآواری و یا آتشفشانی‌آواری تشکیل می‌شود و ذخایر گسترده‌ای از آن در ارتباط با فوران‌های بزرگ تشکیل شده‌اند [۱]. سازوکارهای ممکن برای تشکیل ذخایر بنتونیت عبارتند از دگرسانی درونزادی برجای شیشه آتشفشانی در یک محیط آبی، دگرسانی گرمابی شیشه آتشفشانی و تشکیل رسوب‌های غنی از اسمکتیت منیزیم‌دار در دریاچه‌های قلیایی شور و کفه‌های نمکی [۳، ۸ و ۹]. بنتونیت‌ها بر پایه ویژگی‌های فیزیکی و کانی‌شناسی به دو گروه تقسیم می‌شوند [۱۰]: بنتونیت‌های کلسیم‌دار شامل Ca^{2+} به عنوان کاتیون فراوان قابل مبادله که با جذب آب پایین، قابلیت تورم کم و ناتوانی آن برای معلق ماندن در آب مشخص می‌شوند و بنتونیت‌های سدیم‌دار با

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۶۳۲۳۹۱۲۲۶، نمابر: ۰۵۶۳۲۲۵۲۱۱۴، پست الکترونیکی: nakhaei@birjandut.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.4.12.5]

[DOI: 10.52547/ijcm.29.4.871]

قابلیت جذب مقادیر قابل توجهی آب و تشکیل سوسپانسیون-های غلیظ و چسبنده [۲،۳]. بنتونیت ماده معدنی با توزیع گسترده است و در سراسر جهان استخراج می‌شود. با این وجود، ذخایر اصلی آن در چند (۲۲) کشور واقع است، بطوریکه حدود ۵۵٪ از تولید جهانی سالانه در آمریکا، یونان و کشورهای مشترک المنافع انجام می‌شود [۱۱]. به طور کلی، ارزیابی کیفیت بنتونیت‌ها برای استفاده در صنایع مختلف، نیازمند آزمایش‌های ویژه‌ای برای تشخیص درجه بنتونیت (مقدار اسمکتیت) و همچنین پارامترهای فیزیکوشیمیایی به ویژه برهم کنش آب-رس است [۱۲]. بنتونیت بعنوان یک ترکیب رسی در زمینه های مختلف کاربرد دارد [۱۳]. بنتونیت‌ها به عنوان عامل اتصال در ماسه ریخته‌گری و گندله سازی آهن، به عنوان سدی برای آب و زباله‌های هسته‌ای، در داروسازی، بستر حیوانات، صنایع رنگ، غذا، لاستیک، عطر، سرامیک، گل حفاری و پلاستیک استفاده می‌شوند [۳، ۱۴-۱۶]. مهمترین ویژگی‌های آنها شامل رئولوژی، ظرفیت جذب، آبگیری و تورم، ویژگی اتصال و نفوذناپذیری هستند [۱۷]. رنگ سبز تا زرد بنتونیت-های سدیم‌دار مانع استفاده از آنها در بسیاری از کاربردها می-شود. بنتونیت‌های کلسیم‌دار از آنجا که سفید تا بنفش کمرنگ هستند، می‌توانند در صنایع سرامیک، کاغذسازی، مواد آرایشی، رنگ و داروسازی استفاده شوند [۱۸].

ترکیب بنتونیت تا حدی با شیمی سنگ مادر کنترل می-شود و وابسته به برهم کنش پیچیده عوامل مختلف شامل دما، شیمی سیال، زمان واکنش، نسبت سیال/سنگ و به احتمال بسیار ترکیب مواد پیشین است [۱۹، ۲۰]. به بیان دیگر، شیمی سنگ مادر کنترل کننده نوع و ترکیب فرآورده‌های واکنش است [۱۲]. سنگ‌های حدواسط اغلب مونتموریونیت نوع وایومینگ را تشکیل می‌دهند [۲۱]. بنتونیت نوع وایومینگ دربردارنده اجزاء مونتموریونیت سدیم‌دار و مونتموریونیت کلسیم‌دار است [۲۲، ۲۳]. در سامانه‌های باز، حضور عناصر شیمیایی کلیدی می‌تواند ترکیب اسمکتیت‌های جدید و دگرسانی سنگ مادر را کنترل کند.

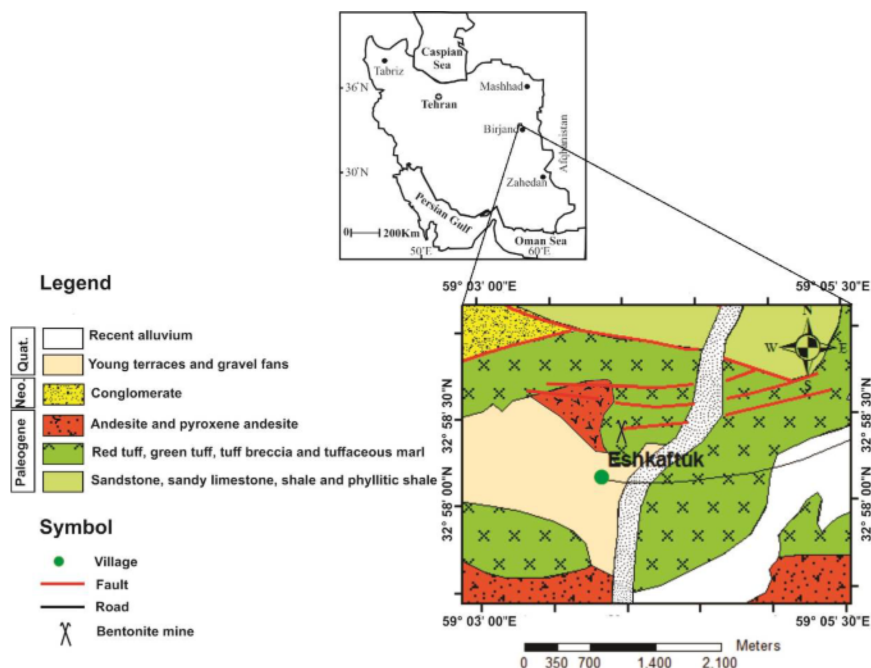
ذخایر بنتونیت ایران در ارتباط با فعالیت‌های آتشفشانی سنوزوئیک در پهنه‌های سمنان-ترود، البرز-آذربایجان، تفرش-تکاب، زاگرس، ایران مرکزی و شرق ایران تشکیل شده‌اند. بنتونیت‌های شرق ایران در دو پهنه قطعه لوت و زمین‌درز سیستان در مناطق تربت حیدریه، تربت جام، کاشمر، گناباد، قاین، فردوس، سرایان، بیرجند و سربیشه رخنمون دارند. برخی از نهشته‌های بنتونیتی منطقه خراسان جنوبی تاکنون توسط پژوهشگران مختلف از نظر چگونگی تشکیل و کاربرد در صنایع مختلف، بررسی شده‌اند (برای مثال، [۲۴-۳۲]). بر اساس اطلاعات موجود، تاکنون پژوهش جامعی پیرامون ذخیره بنتونیت اشکفتوک انجام نشده است. در این مقاله، با معرفی وضعیت زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی معدن بنتونیت اشکفتوک، اطلاعات کاملی پیرامون ویژگی‌های فیزیکی، کانی‌شناسی، زمین‌شیمی و همچنین رفتار عناصر اصلی و کمیاب طی فرآیند تشکیل این ذخیره بنتونیتی ارائه می‌شود.

زمین شناسی

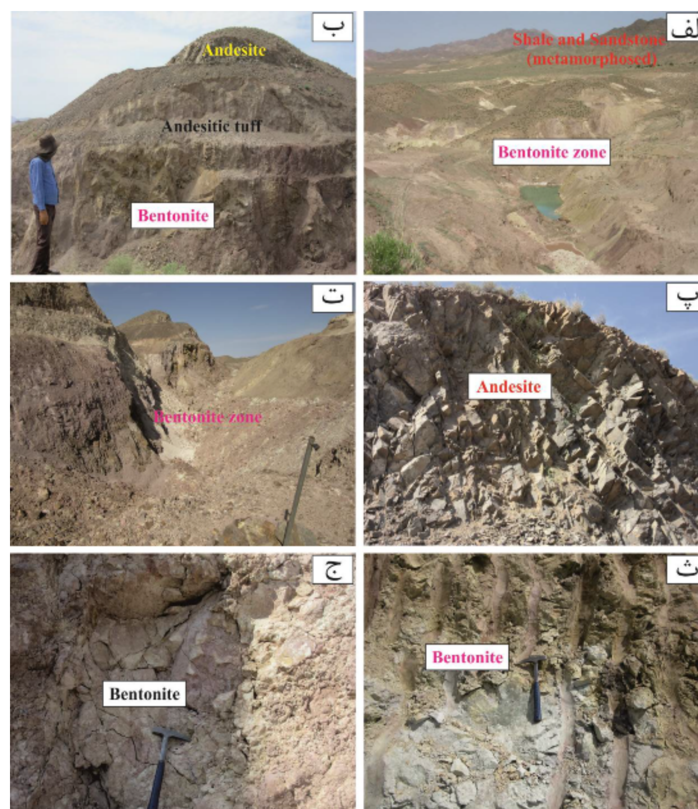
معدن بنتونیت اشکفتوک در ۲۰ کیلومتری شمال غرب بیرجند و در شمال روستای اشکفتوک قرار دارد. بخش اصلی پهنه بنتونیتی دارای موقعیت جغرافیایی ′۰۳ °۵۹ تا "۳۰ ′۰۵ °۵۹ طول شرقی و ً۱۵ ′۵۸ ۳۲ تا ′۵۹ °۳۲ عرض شمالی بوده و در تقسیم‌بندی واحدهای ساختاری ایران [۳۳]، در قطعه لوت واقع است. فعالیت ماگمایی قطعه لوت از ژوراسیک به بعد با نفوذ توده‌هایی چون سرخ کوه آغاز شده و در ترشیری به اوج خود رسیده است، به طوری که سنگ‌های آتشفشانی ترشیری به ویژه ائوسن، با ضخامت حدود ۲۰۰۰ متر، بیش از نیمی از قطعه لوت را می‌پوشانند [۳۳]. قطعه لوت و شرق ایران، به دلیل داشتن موقعیت‌های زمین‌ساختی مختلف در زمان‌های گذشته، دارای فعالیت‌های ماگمایی گسترده با ویژگی‌های زمین‌شیمیایی مختلف است. این امر سبب توانایی قطعه لوت برای انواع کانی‌سازی فلزی و همچنین ذخایر غیرفلزی از جمله بنتونیت شده است.

واحدهای سنگی منطقه اشکفتوک را می‌توان به سه گروه شامل سنگ‌های رسوبی، گدازه‌ها و نهشته‌های آذرآواری تقسیم نمود. قدیمی‌ترین واحد سنگی در منطقه مورد بررسی شامل شیل و ماسه سنگ‌های کمی دگرگون شده همراه با میان لایه‌هایی از سنگ آهک ماسه‌ای هستند که در بخش‌های شمالی معدن بنتونیت (شکل ۱) به رنگ سبز (شکل ۲ الف) دیده می‌شوند.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.4.12.5]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.4.871]



شکل۱ نقشه زمین شناسی منطقه معدن اشکفتوک بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند[۳۴] با تغییرات و رسم دوباره[۳۲].



شکل ۲ الـف) نمـای کلـی از پهنـه بنتـونیتی اشـکفتوک نشـان‌دهنـده شـیل و ماسـه سـنگ‌هـای سـبز و برونزدهـایی از بنتونیـت سـفید رنـگ (دید به شمال غرب)؛ ب) قرارگیری گـدازه‌هـای آنـدزیتی بـر تـوف‌هـای آنـدزیتی و افـق بنتـونیتی در کرانـه جنـوبی معـدن بنتونیـت (دیـد بـه جنـوب غـرب)؛ پ) سـاختار لایـه‌ای در گـدازه‌هـای آنـدزیتی (دیـد بـه جنـوب غـرب)؛ ت) راسـتای کلـی شـرقی-غربـی پهنـه بنتـونیتی اشکفتوک (دید بـه غـرب)؛ ث) بنتونیـت بـا رنـگ‌هـای سـبز مایـل بـه زرد (بـالای عکـس) و آبـی مایـل بـه سـبز (پـایین عکـس)؛ ج) بنتونیـت صورتی.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.4.12.5]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.4.871]

افزون بر این، در بخش شمال غربی منطقه (شکل ۱)، واحد کنگلومرایی نئوژن وجود داشته که به سمت غرب گسترش دارد. سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت تا آندزیت بازالتی به رنگ خاکستری روشن تا تیره به صورت کلاهک با ساختار توده‌ای (شکل ۲ ب) و گاهی لایه‌ای (شکل ۲ پ) ناشی از وجود درزه‌های انقباضی بر توف‌های آندزیتی و افق‌های بنتونیتی قرار دارند (شکل۲ ب). این گدازه‌ها در بخش جنوبی معدن بنتونیت (شکل ۱) و کرانه شمالی روستای اشکفتوک به صورت توده-های به هم پیوسته و مرتفع دیده می‌شوند. توف‌ها از مهم‌ترین واحدهای آذرآواری در منطقه هستند که در اثر دگرسانی به بنتونیت تبدیل شده‌اند. پهنه بنتونیتی اشکفتوک به صورت توده‌ای و لایه‌ای با روند کلی حدود شرقی-غربی به رنگ‌های سفید (شکل‌های ۲ الف و ت)، سفید مایل به سبز، سبز مایل به زرد (شکل۲ ث)، آبی مایل به سبز (شکل۲ ث) و صورتی (شکل۲ ج) دیده می-شود. از نظر ساختاری، منطقه مورد بررسی در معرض عملکرد پهنه گسلی شمال بیرجند و سرشاخه‌های آن با راستای کلی شمال غرب-جنوب شرق و تقریباً شرقی-غربی قرار دارد، به طوری که در اثر آن، خرد شدگی شدید در واحدهای گدازه‌ای و آذراواری (توف‌ها) رخ داده (شکل۲ ب) و تشکیل بنتونیت را در پی داشته است. سختی پایین، لمس صابونی، چسبندگی و شکست صدفی به ویژه در نمونه‌های سفید مایل به سبز و صورتی از ویژگی‌های نمونه‌های بنتونیتی اشکفتوک هستند.

مواد و روش‌ها

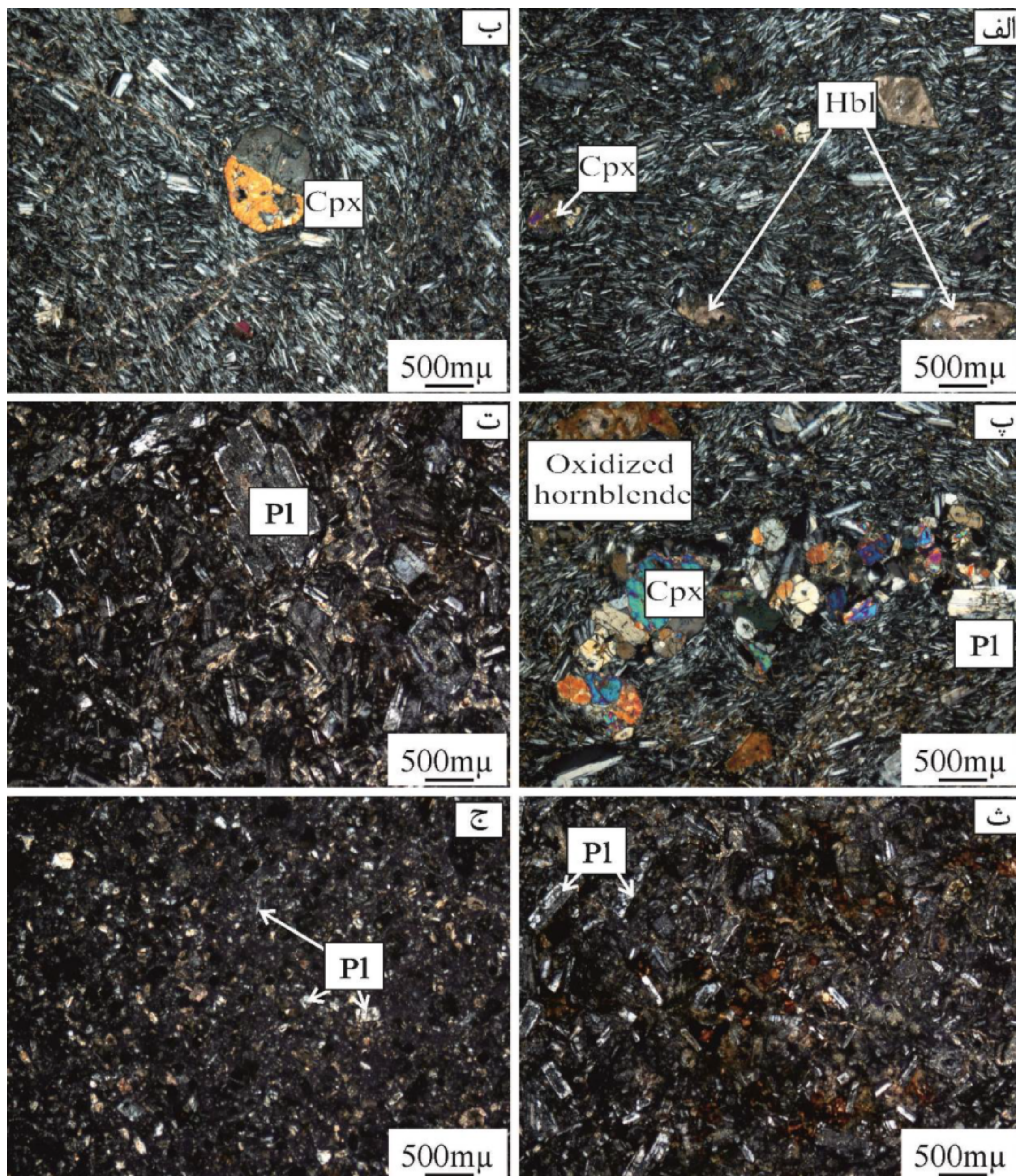
برای بررسی ویژگی‌های سنگ‌نگاری سنگ اولیه و نمونه‌های بنتونیتی، تعداد ۲۵ مقطع نازک تهیه شد. همچنین از نمونه-های بنتونیت با سختی بیشتر و از پودر برخی نمونه‌های کلوخه‌ای، ۷ مقطع نازک تهیه و بررسی گردید. به منظور بررسی ترکیب کانی‌شناسی بنتونیت‌ها، از ۱۰ نمونه برداشت شده از پهنه‌های بنتونیتی، ۴ نمونه به روش پراش پرتو ایکس (XRD) در شرکت کانساران بینالود تهران تجزیه شدند. سپس برای بررسی‌های تکمیلی، این نمونه‌ها در شرایط مختلف عادی، اشباع از حلال اتیلن گلیکول و گرمادهی شده تا ۵۳۰ درجه سانتی‌گراد نیز بررسی کانی‌شناسی شدند. سه نمونه از سنگ میزبان بنتونیت به روش ذوب قلیایی برای عناصر اصلی و به روش طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS) برای عناصر کمیاب و خاکی‌نادر در شرکت زرآزما تجزیه شدند. همچنین، چهار نمونه بنتونیت به روش فلئورسانس پرتوی ایکس (XRF) برای عناصر اصلی در شرکت کانساران بینالود تهران و به روش ICP-MS برای عناصر کمیاب و خاکی نادر در شرکت زرآزما تجزیه گردیدند. سپس به منظور شناسایی دقیق‌تر نوع کانی‌های رسی و ریختار آنها، برای ۴ نمونه بنتونیتی، تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی پراکندگی انرژی پرتوی ایکس (EDX) در شرکت پرتو رایان رستاک (تهران) انجام شد که طی آن تعداد ۳۶ تصویر الکترونی و طیف EDX ۴۰ نقطه تهیه شد. پیش از تصویرگیری و تجزیه نمونه‌ها، نخست نمونه‌های بالک با چسب نواری آلومینیوم و نمونه‌های پودری با چسب دو طرفه استاندارد Agar ساخت کشور انگلیس رساناسازی شدند. در مرحله بعد، رساناسازی سطحی نمونه‌ها به روش نهشت بخار فیزیکی (PVD) با دستگاه COXEM ساخت کشور کره جنوبی انجام گردید. تصویربرداری از این نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی مدل FEI QUANTA 200 ساخت کشور آمریکا و تجزیه عنصری فازهای مختلف دیده شده در تصاویر، با طیف‌سنج Silicon Drift 2017 ساخت کشور آمریکا انجام شد. به منظور بررسی رفتار دمایی نمونه‌های بنتونیت شامل واکنش‌های رخ داده و همچنین تغییر جرم آنها، برای سه نمونه از نمونه‌های تصویربرداری‌شده، گرماسنجی تفاضلی (DTA) و گرماوزن‌سنجی (TGA) در شرکت پرتو رایان رستاک با دستگاه مدل STA504 ساخت شرکت BAHR آلمان در گستره دمای محیط تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد در جو هوا انجام شد.

سنگ نگاری

واحدهای گدازه‌ای و توفی میزبان پهنه بنتونیتی اشکفتوک دارای ترکیب کلی آندزیتی هستند که در ادامه ویژگی‌های آنها بیان می‌شود.

آندزیت: بافت غالب در آندزیت‌ها، پورفیری با زمینه میکرولیتی (شکل‌های ۳ الف، ب، پ) و گاهی گلومروپورفیری ناشی از انباشت پیروکسن و پلاژیوکلاز (شکل۳ پ) است. پلاژیوکلاز حدود ۸۰ تا ۸۵ درصد حجم سنگ را تشکیل می‌دهد و بیشتر در زمینه سنگ حضور دارد. میکروفنوکریست‌های پلاژیوکلاز به مقدار کم وجود دارند. درشت‌بلورهای بی شکل تا

شکل‌دار هورنبلند که به طور کامل کربناتی شده‌اند (شکل ۳ الف) از کانی‌های مافیک تشکیل دهنده آندزیت هستند که به مقدار کم دیده می‌شوند. در برخی نمونه‌ها، هورنبلند دچار اکسایش شده است و به رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز (شکل ۳ پ) و حتی کدر وجود دارد. درشت‌بلورهای نیمه شکل‌دار (شکل ۳ الف) تا شکل‌دار (شکل ۳ ب) و بی شکل پیروکسن (شکل ۳ پ) از دیگر کانی‌های مافیک هستند که در برخی نمونه‌ها به مقدار ۱۰ تا ۱۵ درصد یافت می‌شوند. برخی نمونه‌ها با افزایش مقدار پیروکسن به پیروکسن آندزیت تغییر کرده‌اند.



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی از گدازه، توف و بنتونیت مورد بررسی: الف) بافت پورفیری با زمینه میکرولیتی و درشت‌بلورهای هورنبلند کربناتی شده، ب) درشت‌بلور شکل‌دار پیروکسن و بافت پورفیری با زمینه میکرولیتی، پ) بافت گلومروپورفیری در آندزیت، ت و ث) بلورهای پلاژیوکلاز دگرسان شده در توف آندزیتی و ج) بلورهای ریز پلاژیوکلاز همراه با هورنبلند اکسیدشده و پیروکسن در بنتونیت. تصاویر در نور قطبیده متقاطع، XPL، ثبت شده‌اند (نشانه‌های اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۳۵]).

توف آندزیتی: بررسی‌های سنگ‌نگاری نشان می‌دهد که ترکیب کانی‌شناسی توف‌ها مشابه گدازه‌های آندزیتی بوده به طوری که پلاژیوکلاز فراوان‌ترین کانی تشکیل دهنده است (شکل‌های ۳ ت، ث). پلاژیوکلاز به صورت نیمه شکل‌دار تا بی شکل و به دو صورت درشت بلور و ریز بلور در زمینه سنگ دیده می‌شود. پلاژیوکلازها به طور بخشی به کانی‌های رسی دگرسان شده و آثار ماکل پلاژیوکلازها از بین رفته‌اند. افزون بر این، اکسیدهای آهن به رنگ قهوه‌ای تیره و قهوه‌ای مایل به قرمز (شکل‌های ۳ ت، ث) در اثر دگرسانی کانی‌های مافیک از جمله آمفیبول تشکیل شده و باعث ایجاد رنگ قرمز در نمونه‌های صحرایی این سنگ گردیده‌اند. بخش عمده زمینه برخی نمونه‌ها از کانی‌های رسی تشکیل شده است.

بنتونیت: بیشتر نمونه‌های بنتونیتی اشکفتوک سختی کمی دارند و تهیه مقطع نازک از آنها ممکن نبود. با این وجود، از نمونه‌های با سختی بیشتر و پودر تعدادی از نمونه‌های کلوخه‌ای، ۷ مقطع نازک تهیه شد. بررسی آنها نشان داد که بیشتر نمونه‌ها دارای باقیمانده‌هایی از سنگ آذرآواری اولیه شامل پلاژیوکلاز و هورنبلند اکسید شده (شکل ۳ ج) هستند. بخش عمده زمینه بنتونیت‌ها از کانی‌های رسی تشکیل شده است.

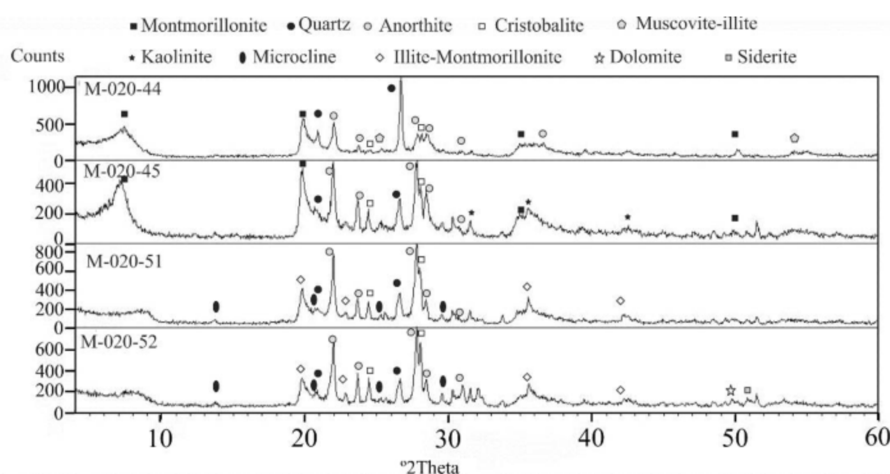
ویژگی‌های کانی‌شناسی

نوع کانی رسی و کانی‌های همراه بنتونیت اشکفتوک با روش XRD تعیین شد. بررسی‌های کانی‌شناسی نشان داد که در بیشتر نمونه‌ها، مونتموریونیت، آنورتیت، کریستوبالیت و کوارتز سازنده‌های اصلی بوده و در مقادیر کمتر با ایلیت، مسکویت، کائولینیت، میکروکلین و دولومیت همراه هستند. ترکیب کانی‌شناسی نمونه‌های بنتونیت مورد بررسی در جدول ۱ آورده شده است.

در شکل۴، الگوی پراش پرتوی ایکس نمونه‌های بنتونیت‌های مورد بررسی آمده است. چنان که دیده می‌شود، کانی مونتموریونیت به عنوان فاز اصلی در بیشتر نمونه‌ها به جز نمونه M-020-51 وجود دارد. بررسی نمونه‌های آماده شده در شرایط ویژه تجزیه کانی شناسی رس‌ها شامل نمونه‌های عادی، اشباع از حلال اتیلن گلیکول و گرمادهی شده تا ۵۳۰ درجه سانتی گراد، نشان داد که کانی اصلی همه آنها مونتموریونیت است (شکل ۵).

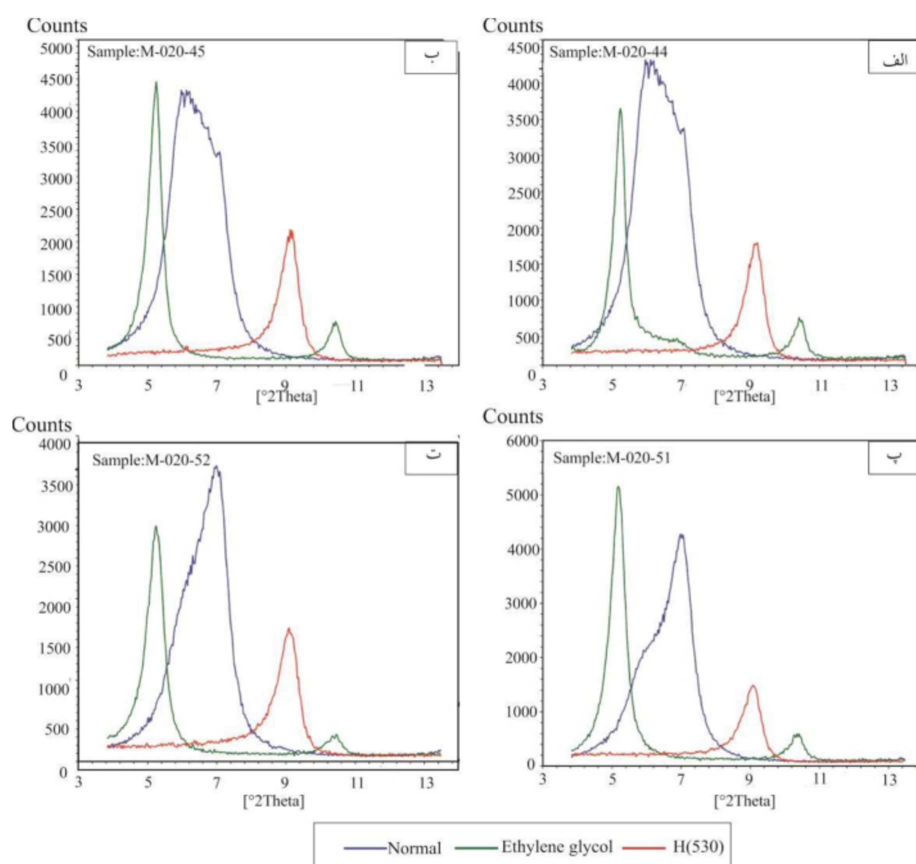
جدول ۱ ویژگی‌های کانی‌شناسی نمونه‌های بنتونیت منطقه مورد بررسی.

شماره نمونه	فاز اصلی	فاز فرعی
M-020-44	مونتموریونیت- کوارتز، آنورتیت، کریستوبالیت	ایلیت، مسکویت
M-020-45	مونتموریونیت، آنورتیت، کریستوبالیت ، کوارتز	کائولینیت
M-020-51	آنورتیت، ایلیت، کریستوبالیت ، کوارتز	میکروکلین
M-020-52	آنورتیت، ایلیت- مونتموریونیت، کریستوبالیت	میکروکلین، کوارتز، دولومیت، کائولینیت، سیدریت



شکل ۴ طیف‌های XRD چهار نمونه از بنتونیت‌های منطقه مورد بررسی.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.4.12.5]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.4.871]

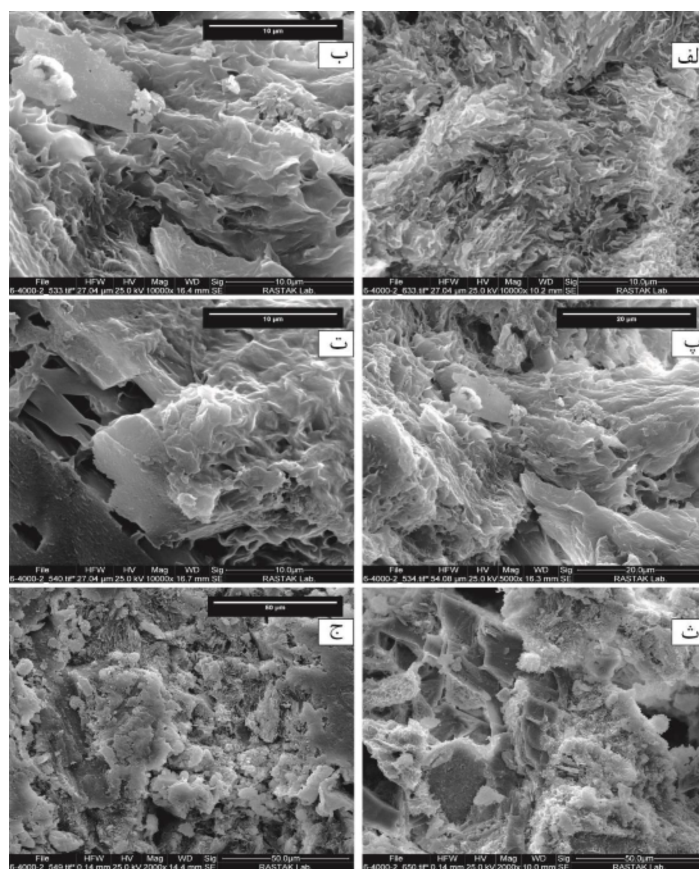


شکل ۵ طیف‌های پراش پرتو ایکس نمونه‌های بنتونیت اشکفتوک در حالت عادی، اشباع شده از حلال اتیلن گلیکول و گرمادهی شده تا ۵۳۰ درجه سانتی گراد.

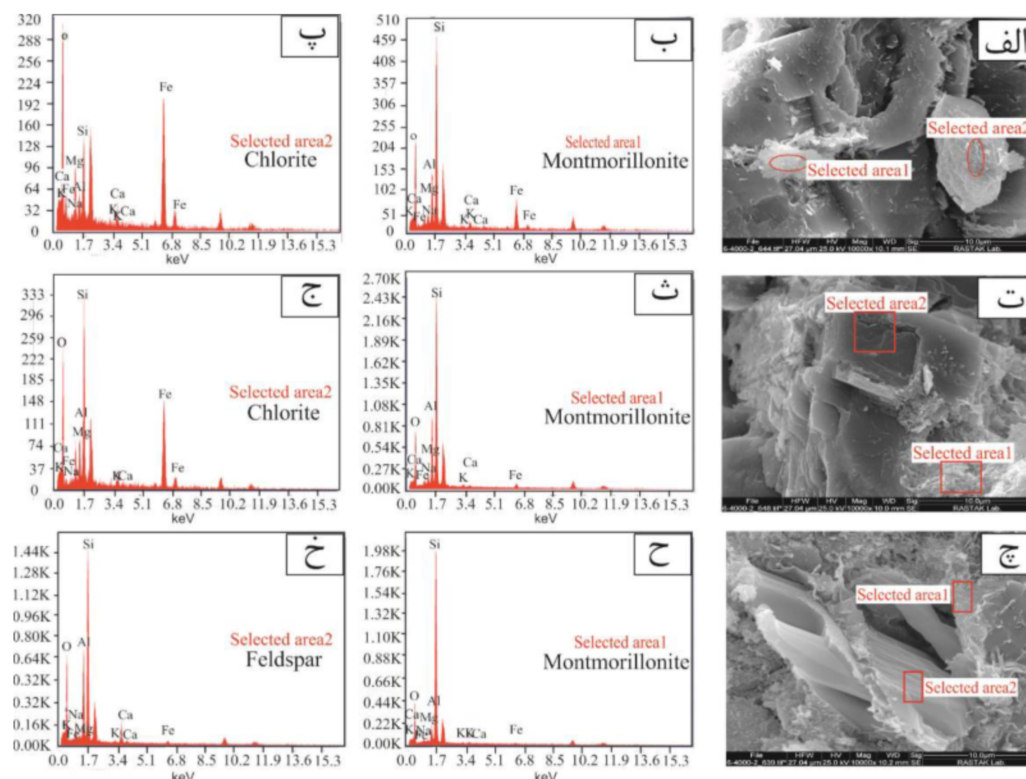
بررسی‌های میکروسکوپی و طیف‌سنجی EDX

ریختار کانی‌های رسی که با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مشخص می‌شود از ویژگی‌های بی‌مانند آنهاست به طوریکه ریختار و بافت می‌توانند معیاری برای شناسایی انواع مختلف رس‌ها باشند [۳۶-۳۸]. در سال‌های اخیر، بررسی‌های کانی‌شناسی و بافتی گسترده‌ای بر پایه روش‌های تصویربرداری الکترونی به منظور تشخیص نوع کانی‌ها بر اساس تفاوت‌های ریختار و ریزبافت‌ها برای کانی‌های رسی از جمله بنتونیت انجام شده است [۳، ۷، ۳۶، ۳۷، ۳۹-۴۴].

تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده از نمونه های بنتونیت اشکفتوک نشان می‌دهد که اسمکتیت (مونتموریونیت) فراوان‌ترین کانی در آنهاست که با ریختار ورقه‌ای یا پولکی با لبه‌های ناهموار و شعله ور (شکل‌های ۶ الف تا ت)، لانه زنبوری (شکل ۶ ث) و دانه ذرتی (شکل ۶ ج) مشخص می‌شود. بافت‌های نامبرده بیانگر مونتموریونیت هستند [۷، ۳۶، ۴۱]. طیف‌های EDX ۴۰ نقطه بر چهار نمونه بنتونیت نیز نشان داد که دانه‌ها در نمونه‌های مختلف اغلب از نوع اسمکتیت (مونتموریونیت) هستند (شکل ۷) و در برخی نمونه‌ها، بلورهای کلریت و فلدسپار نیز وجود دارند (شکل‌های ۷ پ، ج، خ). نسبت Al/Si در بیشتر نقاط تجزیه شده حدود ۱ به ۳ بوده و اسمکتیت از سازنده‌های اصلی بنتونیت اشکفتوک است. بررسی‌ها نشان داد که تشکیل نوع کانی رسی (از جمله اسمکتیت) طی دگرسانی وابسته به نسبت آب-سنگ در محیط است که به نوبه خود درجه شستشوی عناصر مختلف را کنترل می‌کند. تشکیل بنتونیت‌های غنی از اسمکتیت نیازمند نسبت-های بالای آب- سنگ، صرفنظر از ترکیب سنگ‌مادر است [۴۵]. بر این اساس می توان گفت که نسبت آب-سنگ طی فرآیند دگرسانی سنگ مادر به بنتونیت در منطقه اشکفتوک بالا بوده است. مقدار Na و Ca در برخی نقاط تجزیه شده از مونتموریونیت‌ها به ترتیب از ۱٫۴۹ تا۷٫۳۲ و ۰٫۳ تا ۵٫۸۱ متغیر است و نشان می‌دهد که بنتونیت‌های اشکفتوک از نوع مونتموریونیت سدیم –کلسیم‌دار هستند. بر پایه این نتایج، بنتونیت اشکفتوک را می‌توان در رده بنتونیت‌های نوع وایومینگ قرار داد [۲۲، ۲۳، ۴۶].



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌های بنتونیت اشکفتوک که نشان دهنده بافت‌های پولکی و شعله ور (الف تا ت)، لانه زنبوری (ث) و دانه ذرتی (ج) هستند.



شکل ۷ تصاویر برگزیده میکروسکپ الکترونی و نمودارهای EDX در نمونه‌های بنتونیت اشکفتوک.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.4.12.5]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.4.871]

ویژگی‌های گرمایی

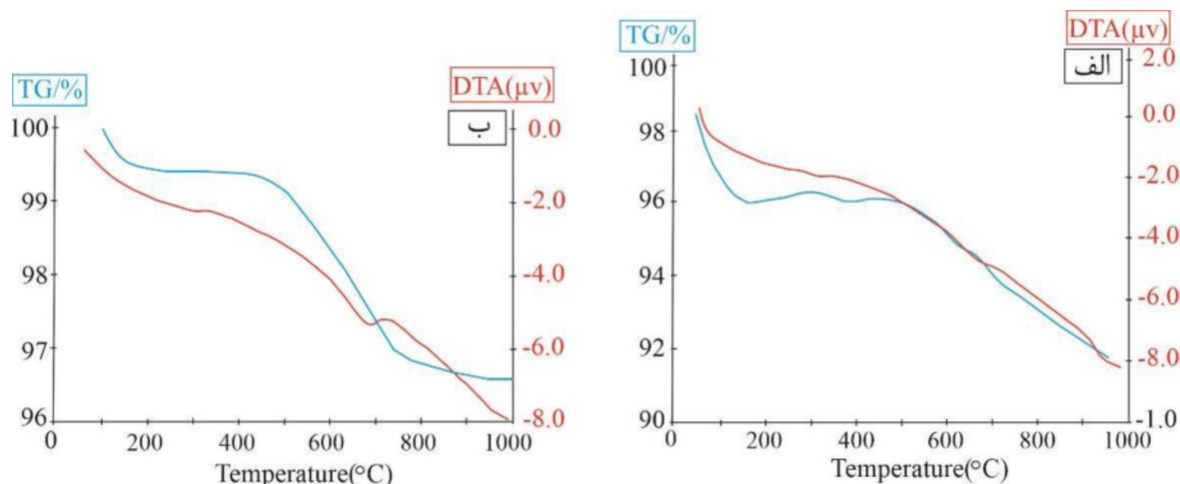
دگرگونی‌های فیزیکی، فیزیکوشیمیایی و یا شیمیایی در بررسی‌های گرمایی، به صورت قله‌های گرماگیر/گرمازا دیده می‌شوند. بر این اساس، قله‌های گرماگیر/گرمازا در منحنی‌های DTA از روش‌های بسیار مفید برای بررسی دگرگونی‌ها بوده و از ابزار اصلی برای تعیین کیفی ویژگی‌های کانی‌های رسی هستند [۴۷، ۴۸]. منحنی‌های DTA/TGA برای دو نمونه از بنتونیت‌های مورد بررسی در گستره دمایی ۵۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد در شکل ۸ نشان داده شده است.

منحنی‌های TGA دو مرحله کاهش جرم قابل توجه را نشان می‌دهد. نخستین و مهمترین کاهش جرم که با از دست دادن آب جذب شده (آبزدایی) همراه است در دمای حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد رخ داده است که این کاهش جرم در نمونه ۴۴ حدود ۴ درصد (شکل ۸ الف) و در نمونه ۵۱ حدود یک درصد (شکل ۸ ب) است. برای نمونه ۴۴ در دمای حدود ۳۵۰درجه سانتیگراد، یک کاهش وزن جزئی دیده می‌شود. در ادامه از حدود 500 تا ^{o}C 1000، کاهش جرم تدریجی رخ داده است. دومین کاهش جرم بین ۵۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد به مقدار ۳ تا ۴ درصد در نمونه ۵۱ دیده می‌شود که می‌تواند به فرآیند آزاد شدن گروه هیدروکسیل با تشکیل مولکول آب طی گرم شدن بر پایه واکنش $2(OH)\rightarrow H_2O+O_r$ (r: باقیمانده) نسبت داده شود [۴۹].

گرمازا یا گرماگیر بودن واکنش‌های رخ داده در نمونه‌ها با تغییر دما را می‌توان بر اساس منحنی DTA تعیین کرد؛ قله DTA به سمت بالا نشان دهنده گرمازا بودن و قله به سمت پایین بیانگر واکنش گرماگیر است. نبود قله‌ای در منحنی DTA (یا در یک گستره دمایی از آن) نشان می‌دهد که با افزایش دما، واکنشی رخ نداده است. روند کاهشی در منحنی‌های DTA هر دو نمونه، بیانگر گرماگیر بودن واکنش های رخ داده در آنهاست. از سوی دیگر، نبود قله‌ای در منحنی DTA نمونه‌های بررسی شده به حضور فلدسپارها از جمله آنورتیت و میکروکلین همراه کانی‌های رسی در نمونه‌های بنتونیتی مربوط است.

زمین شیمی

نتایج تجزیه زمین‌شیمیایی سنگ کل ۴ نمونه بنتونیت و ۳ نمونه سنگ میزبان در جدول ۲ آورده شده است. بر اساس تجزیه عناصر اصلی و کمیاب، نمونه‌ها به ترتیب دارای ۵۷٫۸۷ تا ۶۴٫۱۸ و ۵۹٫۲۲ تا ۵۹٫۳۷ درصد سیلیس، ۱۶٫۵۳ تا ۱۹٫۰۲ و ۱۶٫۴۵ تا ۱۶٫۵۹ درصد Al_2O_3، ۵٫۲۶ تا ۷٫۶۵ و ۵ درصد Fe_2O_3، ۱٫۹۱ تا ۲٫۷ و ۳٫۸۷ تا ۴٫۷۰ درصد MgO، ۰٫۶۵ تا ۰٫۷۸ و ۰٫۶۷ تا ۰٫۷۲ درصد TiO_2 هستند. مقدار مواد فرار (LOI) در بنتونیت‌ها و سنگ میزبان نیز به ترتیب ۵٫۹۳ تا ۹٫۴۱ و ۲٫۲۲ تا ۲٫۵۴ درصد است (جدول۲). چنان که انتظار بود، محتوای قلیایی بنتونیت‌ها بسیار کمتر از ترکیب سنگ‌های میزبان است که بیانگر از دست رفتن قابل توجه قلیایی‌ها طی دگرسانی است [۲۱، ۵۰-۵۳].



شکل ۸ منحنی‌های DTA و TGA برای نمونه‌های بنتونیتی اشکفتوک: الف) نمونه M-020-44، ب) نمونه M-020-51.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.4.12.5]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.4.871]

جدول۲ نتایج تجزیه شیمیایی عناصر اصلی و کمیاب نمونه‌های بنتونیت اشکفتوک و سنگ‌های مادر آن‌ها.

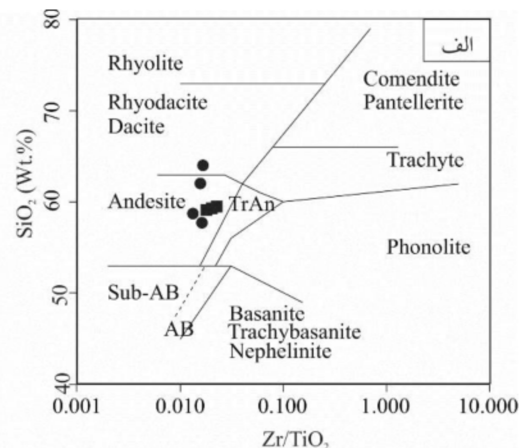
نوع سنگ	بنتونیت				سنگ مادر		
شماره نمونه	M-020-44	M-020-45	M-020-51	M-020-52	M-020-46	M-020-47	M-020-48
SiO_2 (wt %)	۶۴٫۱۸	۵۸٫۶۶	۶۲٫۰۷	۵۷٫۸۷	۵۹٫۳۷	۵۹٫۳۷	۵۹٫۲۲
TiO_2	۰٫۶۴۷	۰٫۷۸۳	۰٫۷۲۵	۰٫۶۷۴	۰٫۷۲	۰٫۷۰	۰٫۶۷
Al_2O_3	۱۶٫۵۵	۱۹٫۰۲	۱۸٫۳۴	۱۶٫۷۴	۱۶٫۵۳	۱۶٫۴۵	۱۶٫۵۹
Fe_2O_3t	۵٫۴۶	۵٫۲۶	۵٫۸۱	۷٫۶۵	۵	۵	۵
MnO	۰٫۰۰۹	۰٫۰۱	۰٫۰۱۹	۰٫۰۹۲	۰٫۱۱	۰٫۱۰	۰٫۰۹
MgO	۲٫۴۲	۲٫۵	۱٫۹۱	۲٫۷	۳٫۸۷	۴٫۷۰	۴٫۴۳
CaO	۱٫۴۳	۲٫۷	۳٫۰۴	۴٫۱	۶٫۵۵	۶٫۳۴	۶٫۷۷
Na_2O	۱٫۳۱	۲٫۰۲	۱٫۹۶	۲٫۰۱	۴٫۰۸	۴٫۰۳	۳٫۹۶
K_2O	۰٫۴۲	۰٫۳۷	۰٫۹۴	۰٫۴۴	۱٫۱۶	۱٫۱۶	۱٫۰۶
P_2O_5	۰٫۱۱۹	۰٫۰۸۱	۰٫۰۲۶	۰٫۱۰۱	۰٫۱۴	۰٫۱۷	۰٫۱۳
LOI	۸٫۳۶	۹٫۴۱	۵٫۹۳	۸٫۵۶	۲٫۵۴	۲٫۲۶	۲٫۲۲
Total	۱۰۰٫۹۰	۱۰۰٫۸۱	۱۰۰٫۷۷	۱۰۰٫۹۴	۱۰۰٫۰۷	۱۰۰٫۲۸	۱۰۰٫۱۴
Ba(ppm)	۲۶	۳۹	۵۴	۱۲۰	۱۶۵	۱۷۱	۱۷۴
Rb	۱۸	۱۴	۲۳	۲۶	۴۴	۵۷	۴۹
Sr	۱۸۴	۱۲۷	۲۵۷	۳۱۵	۳۶۸٫۳	۳۷۶٫۹	۴۲۰٫۲
Zr	۱۰۸	۱۰۵	۱۱۳	۱۰۸	۱۵۰	۱۶۱	۱۲۶
Nb	۷٫۵	۸٫۱	۸٫۲	۶٫۵	۵٫۹	۷٫۶	۹٫۳
Co	۱۱٫۷	۱۳٫۵	۲۰٫۳	۷٫۱	۲۰٫۸	۲۱٫۱	۲۳٫۲
Y	۱۰٫۴	۷٫۹	۸٫۵	۱۱٫۲	۱۵٫۳	۱۶٫۶	۱۳٫۸
Cs	۸٫۳	۷٫۵	۱۳٫۷	۸٫۹	۴٫۲	۲٫۷	۳
Ta	۰٫۸۶	۰٫۹	۰٫۹۲	۰٫۶۱	۰٫۶	۰٫۶۹	۰٫۵۳
Hf	۳٫۵۱	۳٫۰۹	۳٫۴۱	۳٫۱۷	۴٫۱۷	۴٫۱۳	۳٫۴۶
Th	۵٫۴۲	۴٫۶۵	۵	۵٫۱۳	۶٫۵۲	۷٫۶۹	۵٫۹۵
U	۱٫۶	۰٫۸	۱٫۳	۱٫۱	۱٫۵	۱٫۷	۱٫۲
La	۱۵	۱۲	۱۳	۱۴	۱۹	۱۹	۱۷
Ce	۳۲	۲۶	۲۸	۳۱	۳۵	۳۶	۳۰
Pr	۱٫۹۴	۱٫۰۷	۱٫۰۲	۱٫۵۴	۳٫۷۳	۴٫۲۹	۳٫۴۱
Nd	۷٫۶	۳٫۳	۳٫۵	۶٫۲	۱۵	۱۷٫۶	۱۲٫۶
Sm	۱٫۷۵	۰٫۷۷	۰٫۷۹	۱٫۳۶	۲٫۴	۲٫۳۸	۲٫۱۲
Eu	۰٫۶۳	۰٫۳۳	۰٫۴	۰٫۶۱	۱٫۲۱	۱٫۶۴	۱
Gd	۱٫۷۹	۰٫۹۳	۱٫۱۲	۱٫۷۸	۲٫۸۸	۴٫۱۷	۳٫۱۷
Tb	۰٫۴۴	۰٫۳۲	۰٫۳۱	۰٫۴۲	۰٫۵۴	۰٫۵۳	۰٫۴۲
Dy	۲٫۱۶	۱٫۴۶	۱٫۷۶	۲٫۰۱	۳٫۵۸	۴٫۴۹	۳٫۲۹
Er	۱٫۴۹	۱٫۱۴	۱٫۳۶	۱٫۵۳	۱٫۷۵	۱٫۵	۱٫۴۱
Tm	۰٫۱۷	۰٫۱	۰٫۱۴	۰٫۱۸	۰٫۲۶	۰٫۴۳	۰٫۳۸
Yb	۱	۰٫۹	۱٫۲	۱٫۲	۱٫۷	۱٫۹	۱٫۶
Lu	۰٫۲۱	۰٫۱۷	۰٫۲۴	۰٫۲۲	۰٫۴۳	۰٫۵۹	۰٫۴۴

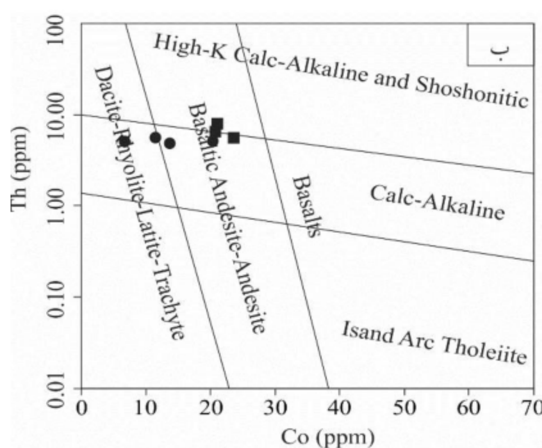
نمونه‌های بنتونیت در مقایسه با سنگ میزبان، مقدار Fe_2O_3 بیشتری دارند که با حضور هورنبلند و بیوتیت‌های اکسید شده در آنها همخوانی دارد. بیشترین مقدار Fe_2O_3 مربوط به نمونه M-020-52 است. چنان که پیشتر بیان شد، فراوانی آهن در برخی نمونه‌ها از جمله نمونه مورد اشاره سبب ایجاد رنگ قرمز مایل به صورتی شده است (شکل ۲ ج). در نمونه‌های بنتونیت منطقه اشکفتوک، مقدار CaO بیش از Na_2O است. این ویژگی با حضور کانی آنورتیت به عنوان فاز اصلی و دولومیت به عنوان فاز فرعی در بعضی نمونه‌ها همخوانی دارد. برای نامگذاری نمونه‌های بنتونیت و سنگ میزبان آن در معدن اشکفتوک از نمودارهای SiO_2 نسبت به Zr/TiO_2 [۵۴] و Th نسبت به Co [۵۵] استفاده شد (شکل ۹). بر این اساس، سنگ اولیه بنتونیت‌های مورد بررسی دارای ترکیب آندزیتی و نمونه‌های بنتونیت دارای ترکیب آندزیت تا ریوداسیت/داسیت هستند. سری ماگمایی نمونه‌های بنتونیت و سنگ مادر آنها بر پایه نمودار Th نسبت به Co [۵۵] آهکی قلیایی است (شکل ۹ ب).

میانگین عناصر خاکی نادر (REE) کل برای بنتونیت‌های اشکفتوک ۵۷٫۳۸ ppm و برای سنگ‌های میزبان ۸۳٫۲ ppm است. مقدار میانگین عناصر خاکی‌نادر سبک (LREE) کل

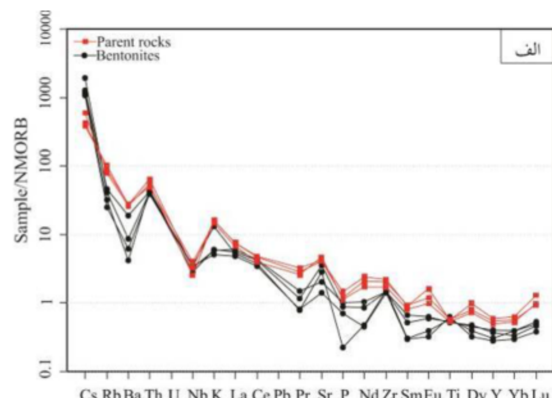
[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.4.12.5]
[DOI: 10.52547/ijcm.29.4.871]

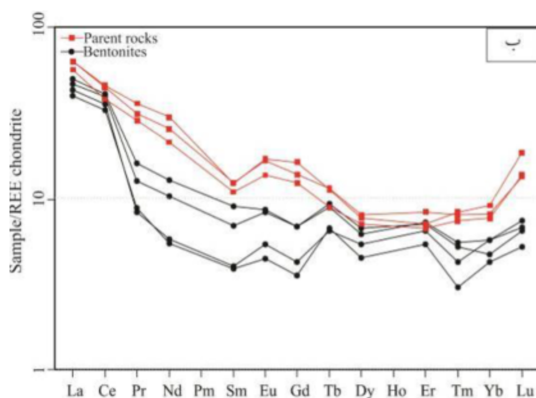
(La, Ce, Pr, Nd) برای بنتونیت‌ها و سنگ‌های میزبان به ترتیب ۴۹٫۲۹ گرم در تن و ۷۰٫۹۰ گرم در تن است. مقدار میانگین عناصر خاکی‌نادر متوسط (MREE) کل (Sm, Eu, Gd, Tb, Dy) به ترتیب ۵٫۲۸ گرم در تن و ۱۱٫۲۷ گرم در تن و مقدار عناصر خاکی‌نادر سنگین (HREE) کل (Er, Tm, Yb, Lu) به ترتیب ۲٫۸۱ و ۱٫۰۳ گرم در تن است. نمودارهای عناصر کمیاب بهنجار شده با بازالت‌های پشته‌های میان-اقیانوسی عادی (N-MORB) [۵۶] و عناصر خاکی‌نادر بهنجار شده با کندریت [۵۷] برای گدازه‌های حدواسط و نمونه‌های بنتونیتی اشکفتوک در شکل۱۰ نشان داده شده است. بی هنجاری منفی Nb، Ti و P به همراه غنی‌شدگی عناصر سنگ-دوست بزرگ یون (LILE) چون K، Rb و Th در نمونه‌های بررسی شده (شکل ۱۰ الف) از ویژگی‌های گدازه‌های آهکی-قلیایی وابسته به فرورانش است [۵۸، ۵۹]. بی هنجاری منفی Ba می‌تواند بیانگر جدایش فلدسپارها و یا نقش پوسته قاره‌ای بالایی در فرایندهای ماگمایی باشد [۶۰]. مقایسه نمونه‌های گدازه‌ای و بنتونیت‌های اشکفتوک با N-MORB نشان می‌دهد که ماگماهای سازنده گدازه‌ها از یک گوشته شبیه به گوشته پشته‌های میان اقیانوسی شکل گرفته‌اند، با این تفاوت که ماگمای منطقه بررسی شده از عمق بیشتر (نسبت به سنگ خاستگاه MORB) که در آن گارنت پایدار بوده اما پلاژیوکلاز حضور نداشته است، تشکیل شده‌اند. بی هنجاری مثبت Eu در نمونه‌های بررسی شده بیانگر خاستگاه گوشته‌ای و بی هنجاری مثبت LILEها نشانگر نقش سیال‌ها در ذوب گوشته است [۶۱]. از آنجا که پلاژیوکلاز حمل کننده اصلی عنصر Eu است، بی هنجاری مثبت Eu می‌تواند بیانگر دگرسانی این کانی در سنگ میزبان در معرض سیال‌ها باشد. چنان که نتایج سنگ نگاری بیان شد، پلاژیوکلازها در نمونه‌های بررسی شده به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند (جدول ۳).





شکل ۹ نمودارهای الف) SiO_2 نسبت به Zr/TiO_2 [۵۴] و ب) Th نسبت بهCo [۵۵] و موقعیت نمونه‌های بنتونیتی منطقه مورد بررسی (دایره) و سنگ مادر(مربع) بر آنها.





شکل۱۰ الف) نمودار عنکبوتی عناصر کمیاب بهنجار شده با N-MORB [۵۶]؛ ب) نمودار عناصر خاکی نادر بهنجار شده با کندریت [۵۷] برای گدازه‌های حدواسط و بنتونیت‌های اشکفتوک.

[DOI: 10.52547/ijcm.29.4.871]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.4.12.5]

جدول۳ نتایج بررسی افزایش و کاهش عناصر اصلی (درصد وزنی) و عناصر کمیاب (گرم در تن) برای نمونه‌های بنتونیت اشکفتوک.

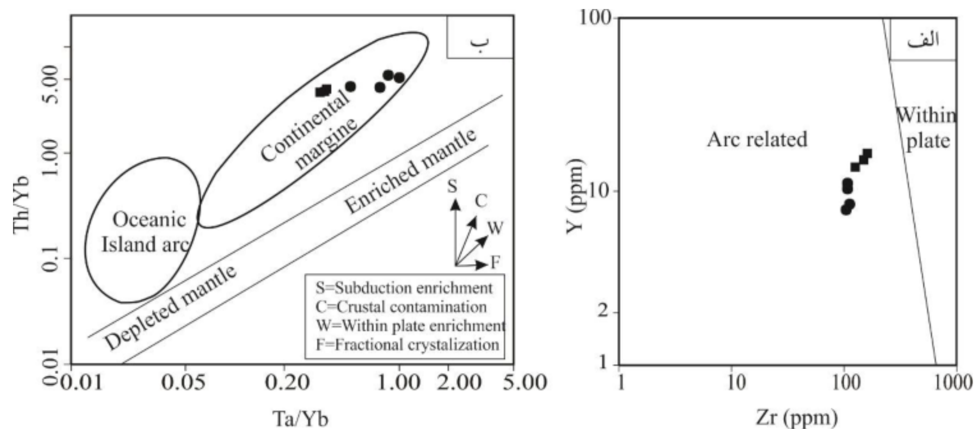
شماره نمونه	میانگین بنتونیت‌ها	میانگین سنگ‌های مادر	افزایش و کاهش
SiO_2 (wt %)	۶۰٫۶۹	۵۹٫۳۲	۱۳٫۰۵
TiO_2	۰٫۷۰	۰٫۶۹	۰٫۱۵
Al_2O_3	۱۸٫۴۱	۱۶٫۵۲	۴٫۶۱
Fe_2O_3t	۳٫۲۶	۴٫۷۹	۲٫۲۴
MnO	۰٫۰۳	۰٫۱	-۰٫۰۶
MgO	۲٫۳۸	۴٫۳۳	-۱٫۴۷
CaO	۲٫۸۱	۶٫۵۵	-۳٫۱۵
Na_2O	۱٫۸۲	۴٫۰۲	-۱٫۸۲
K_2O	۰٫۵۴	۱٫۱۲	-۰٫۴۸
P_2O_5	۰٫۰۸	۰٫۱۴	-۰٫۰۴
LOI	۹٫۰۶	۲٫۳۴	۷٫۳۴
Ba(ppm)	۵۹٫۷۵	۱۷۰	-۹۷٫۶۱
Rb	۲۰٫۲۵	۵۰	-۲۵٫۸۴
Sr	۲۲۰٫۷۵	۳۸۸٫۴۶	-۱۲۵٫۰۸
Zr	۱۰۸٫۵	۱۴۵٫۶	-۱۶٫۱۲
Nb	۷٫۵۷	۶٫۷	۱٫۴۴
Co	۱۳٫۱۵	۲۱٫۷	-۶٫۱۰
Y	۹٫۵	۱۵٫۲۳	-۳٫۸۹
Cs	۹٫۶	۳٫۳	۸٫۱۰
Th	۵٫۰۵	۶٫۷۲	-۰٫۶۹
REE	۵۷٫۳۶	۸۶٫۲۲	-۱۷٫۹۲

به طور کلی، ترکیب عناصر ناسازگار بنتونیت‌ها مشابه سنگ‌های آتشفشانی میزبان است و نشان می‌دهد که عناصر ناسازگار طی فرآیندهای دگرسانی اغلب غیر متحرک هستند. عناصری چون Ba و K در بنتونیت‌ها نسبت به سنگ‌های میزبان، کاهیدگی نشان می‌دهند که با دگرسانی فلدسپارها در ارتباط است. مقدار عناصر خاکی‌نادر سنگ مادر و نمونه‌های بنتونیت بهنجار شده نسبت به کندریت [۵۶] بیانگر غنی‌شدگی همه نمونه‌ها از LREEهاست (شکل ۱۰ ب). غنی‌شدگی LREEها نسبت به HREEها در نمونه‌ها می‌تواند به دلیل باقی ماندن گارنت در خاستگاه [۶۲] و یا دگرنهادی توسط سیال‌های ناشی از آبزدایی پوسته اقیانوسی فرورانده [۶۳] باشد. به طور کلی، عناصر خاکی نادر در نمونه‌های بنتونیت در مقایسه با سنگ مادر، تهی‌شدگی نشان می‌دهند که بیانگر وجود شرایط مورد نیاز برای تحرک این عناصر است. مقدار *Eu/Eu بهنجارشده نسبت به کندریت در سنگ مادر و نمونه‌های بنتونیتی به ترتیب ۱٫۱۸ تا ۱٫۴۱ و ۰٫۹۹ تا ۱٫۳۰ است. چنان که دیده می‌شود، این مقدار در پهنه بنتونیتی گسترش بیشتری دارد که تهی‌شدگی این عنصر را نشان داده و وجود شرایط مورد نیاز برای تحرک یوروپیوم را تأیید می‌کند.

ویژگی‌های زمین‌شیمیایی چون بی هنجاری منفی Ti ،Nb و P به همراه غنی‌شدگی LILEها (مانند Rb ،K و Th) که پیشتر در بخش زمین‌شیمی بیان شد، از مشخصه‌های گدازه‌های آهکی‌قلیایی وابسته به حاشیه قاره‌ای فعال است. محیط زمین‌ساختی نمونه‌های بنتونیتی اشکفتوک و سنگ مادر آنها بر پایه نمودارهای رده‌بندی زمین‌ساختی Y نسبت به Zr [۶۴] و Th/Yb نسبت به Ta/Yb [۶۵] تعیین شد. چنان که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، نمونه‌های مورد بررسی در گستره وابسته به کمان حاشیه قاره قرار دارند.

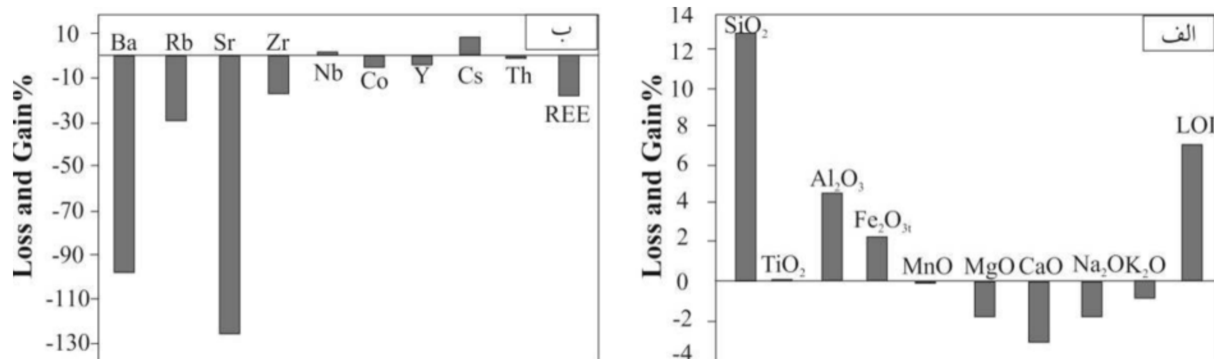
تغییرات جرم

در فرآیند دگرسانی سنگ‌ها، برخی عناصر متحرک بوده، در حالیکه برخی دیگر نامتحرک هستند و طی دگرسانی دچار غنی‌شدگی می‌شوند [۵۳]. افزایش یا کاهش عناصر اصلی طی دگرسانی به ماهیت سنگ خاستگاه و ترکیب فاز سیال بستگی دارد و نوع کانی‌های تشکیل شده را کنترل می‌کند. عناصر آزاد شده طی دگرسانی بیانگر نقش ترکیب سنگ مادر است [۶۶]. افزون بر این، نوع کانی رسی تشکیل شده (از جمله اسمکتیت) وابسته به نسبت آب-سنگ است که به نوبه خود مقدار شستشوی عناصر مختلف را کنترل می‌نماید. تشکیل بنتونیت‌های غنی از اسمکتیت نیازمند نسبت‌های بالای آب-سنگ صرفنظر از ترکیب سنگ مادر است [۶۶]. روش‌های مختلفی برای محاسبه کاهش و یا افزایش جرم درسامانه‌های مختلف دگرسانی ارائه شده است [۶۷-۷۲]. در این پژوهش، تغییرات زمین‌شیمیایی مربوط به فرآیند بنتونیتی‌شدن در منطقه اشکفتوک بر پایه محاسبه تغییرجرم عناصر [۶۷] بررسی شد و فراوانی عنصر Ti در نمونه‌های بنتونیتی و سنگ‌های آتشفشانی وابسته به آن‌ها به عنوان شاخص عنصر بی‌تحرک در فرآیند بنتونیتی‌شدن به عنوان مبنای محاسبات انتخاب گردید.



شکل۱۱ نمودارهای الف) Y نسبت به Zr [۶۴] و ب) Th/Yb نسبت به Ta/Yb [۶۵] برای تفکیک محیط زمین ساختی بنتونیت‌های مورد بررسی و سنگ مادر آن‌ها.

شکل۱۲ تغییرات جرم عناصر اصلی و کمیاب بنتونیت‌های اشکفتوک را نشان می‌دهد. چنان که در شکل ۱۲ الف دیده می‌شود، اجزایی چون K_2O ، Na_2O، CaO، MgO و MnO کاهیدگی و SiO_2، Al_2O_3 و Fe_2O_3 افزایش نشان می‌دهند. تهی‌شدگی کمK_2O نسبت به سنگ مادر به دلیل وجود ایلیت، فلدسپار قلیایی و سریسیت به عنوان فاز فرعی در نمونه‌های مورد بررسی است. پلاژیوکلاز مهم‌ترین کانی دارای Na در سنگ مادر بنتونیت‌های مورد بررسی است. رخداد دگرسانی و شستشوی این عنصر طی تشکیل بنتونیت می‌تواند سبب از دست رفتن آن شود [۷۳]. رفتار SiO_2 به ترکیب سنگ مادر بستگی دارد. به دلیل حضور فازهای فرعی کوارتز و کریستوبالیت در بیشتر نمونه‌های بنتونیتی، SiO_2 غنی شدگی قابل توجهی را نشان می‌دهد. تهی شدگی عناصر فلزی چون منیزیم و منگنز می‌تواند نتیجه فعالیت‌های گرمابی و جایگزین شدن آنها در رگه‌های سیلیسی باشد. به دلیل وجود شرایط قلیایی برای تشکیل بنتونیت، آلومینیوم به عنوان یک عنصر به نسبت نامتحرک دچار غنی‌شدگی شده است. چنان که در بخش سنگ‌نگاری بیان شد، اکسایش کانی‌های مافیک از جمله آمفیبول سبب تشکیل اکسید آهن در نمونه‌های بنتونیتی شده که غنی‌شدگی آهن را در پی داشته است. با توجه به شکل ۱۲ب، عناصر سنگ‌دوست بزرگ یون چون Ba، Rb و Sr بیشترین تهی شدگی را نشان می‌دهند. Sr رفتاری مشابه Ca و Rb رفتاری مشابه K دارد. غنی‌شدگی سزیم به قابلیت جذب انتخابی این عنصر در ساختار مونتموریونیت مربوط است. بنتونیت سدیم به دلیل دارا بودن فضای بین لایه‌ای قابل توجه، پتانسیل بالایی برای جذب این عنصر دارد [۷۴]. با بررسی رفتار عناصر خاکی‌نادر در مناطق دگرسانی، اطلاعات ارزشمندی در ارتباط با ویژگی‌های محلول گرمابی، نسبت آب-سنگ و مجموعه کانی‌های تشکیل شده در اثر فرآیند دگرسانی به دست می‌آید [۷۵]. چنانکه بیان شد و در شکل ۱۲ ب نیز مشخص است، عناصر خاکی‌نادر در نمونه‌های بنتونیت اشکفتوک در مقایسه با سنگ مادر، تهی شدگی نشان می‌دهند که وجود شرایط مورد نیاز برای تحرک این عناصر (نسبت بالای آب-سنگ) را تأیید می‌نماید.



شکل ۱۲ نمودار تغییرات جرم در بنتونیت‌های منطقه اشکفتوک.

برداشت

۱- در منطقه اشکفتوک در شمال غرب بیرجند، سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی با ساختار توده‌ای و گاهی لایه‌ای بر توف-های آندزیتی و افق‌های بنتونیتی قرار دارند. منطقه مورد بررسی در معرض عملکرد پهنه گسلی شمال بیرجند و سرشاخه‌های آن با راستای کلی شمال غرب- جنوب شرق و شرقی-غربی قرار دارد که سبب خردشدگی در واحدهای گدازه-ای- آذرآواری و تسریع فرآیند تشکیل بنتونیت شده است.

۲- سنگ‌های آندزیتی دارای بافت پورفیری با زمینه میکرولیتی، گلومروپورفیری و ریزسنگی جریانی بوده و پلاژیوکلاز، هورنبلند و پیروکسن مهمترین کانی‌های سازنده آن هستند. بررسی مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های بنتونیت نشان داد که بخش عمده زمینه بنتونیت‌ها از کانی‌های رسی تشکیل شده و افزون بر این، دارای باقیمانده‌هایی از سنگ اولیه شامل پلاژیوکلاز و هورنبلند اکسید شده است.

۳- نتایج تجزیه کانی شناسی ویژه رس‌ها در شرایط مختلف نشان داد که کانی اصلی همه نمونه‌های مورد بررسی مونتموریونیت است.

۴- بر اساس طیف‌های پراکنش انرژی پرتوی ایکس (EDX)، مقدار Na و Ca در نقاط تجزیه شده بر مونتموریونیت‌ها به ترتیب از ۱٫۴۹ تا ۷٫۳۲ و ۰٫۳ تا ۵٫۸۱ متغیر بوده و از نوع مونتموریونیت سدیم –کلسیم‌دار هستند. نسبت Al/Si در بیشتر نقاط تجزیه شده حدود ۱به۳ است که حضور اسمکتیت به عنوان یکی از سازنده‌های اصلی بنتونیت اشکفتوک را تأیید می‌کند. تشکیل بنتونیت‌های غنی از اسمکتیت در منطقه اشکفتوک بیانگر نسبت بالای آب- سنگ طی فرآیند دگرسانی سنگ مادر است.

۵- بررسی ویژگی‌های گرمایی و منحنی‌های DTA-TGA برای نمونه‌های بنتونیت در گستره دمایی ۵۰ تا ۱۰۰۰درجه سانتیگراد نشان داد که مهمترین کاهش جرم در دمای حدود ۱۵۰ درجه سانتیگراد به مقدار حدود ۴ درصد در نمونه ۴۴ و حدود یک درصد در نمونه ۵۱ رخ داده است که بیانگر از دست دادن آب جذب شده است. دومین کاهش جرم بین ۵۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد به مقدار ۳ تا ۴ درصد برای نمونه ۵۱ دیده شد که به فرآیند آزاد شدن گروه هیدروکسیل با تشکیل مولکول آب طی فرآیند گرم شدن مربوط است.

۶- بی هنجاری منفیNb، Ti و P به همراه غنی‌شدگی LILEها (K، Rb و Th) در گدازه‌ها و نمونه‌های بنتونیتی از ویژگی‌های گدازه‌های آهکی‌قلیایی وابسته به فرورانش است. نمودارهای تعیین محیط زمین‌ساختی نمونه‌های بنتونیتی اشکفتوک و سنگ مادر آن‌ها بر پایه عناصر کمیاب نیز نشان داد که نمونه‌های مورد بررسی در گستره کمان آتشفشانی وابسته به فرورانش قرار دارند. عناصر خاکی نادر در نمونه‌های بنتونیت در مقایسه با سنگ مادر، تهی‌شدگی نشان می‌دهند که وجود شرایط مورد نیاز برای تحرک این عناصر (نسبت بالای آب- سنگ) را تأیید می‌کند.

مراجع

[1] Christidis G., Huff D H., *"Geologic aspects and genesis of bentonites"*, Elements 5 (2009) 93–98.

[2] Eisenhour D.D., Brown R.K., *"Bentonite and its impact on modern life"*, Elements 5 (2009) 83–88.

[3] Karakaya M. Ç., Necati Karakaya N., Bakır S., *"Some properties and potential applications of the Na- and Ca-bentonites of Ordu (N.E. Turkey)"*, Applied Clay Science 54 (2011) 159–165.

[4] Bergaya F., Lagaly G., *"General introduction: clays, clay minerals, and clay science"*, Developments in clay science 1(2013)1-18.

[5] Ekinci Şans B., Esenli F., Kadir S., Elliott W.C., *"Genesis of smectite in siliciclastics and pyroclastics of the Eocene I˙slambeyli Formation in the Lalapaş a region, NW Thrace, Turkey"*, Clay Minerals 50(2015) 459_483.

[6] Huff W.D., *"K-bentonites: A review"*, American Mineralogist 101(2016) 43-70.

[7] Kadir S., Külah T., Önalgil N., Erkoyun H., Elliott W.C., *"Mineralogy, geochemistry, and genesis of bentonites in Miocene volcanic-sedimentary units of the Ankara-Çankiri, central Anatolia, Turkey"*, Clays and Clay Minerals 65(2017) 64–91.

[8] Güven N., *"Smectites"*, In: S.W. Bailey, (editor), Hydrous Phyllosilicates: Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, Washington, D.C.,19(1988) pp. 497–559.

[9] Galan E., Castillo A., *"Sepiolite-Palygorskite in Spanish Tertiary Basins; genetical patterns in continental environments"*, In: A Singer., E Galan,

[DOR: 20.1001.1.17263689.1400.29.4.12.5]

[DOI: 10.52547/ijcm.29.4.871]

arc volcanic caldera setting", Chemical Geology 355(2013) 28–44.

[21] Christidis G.E., Scott P.W., *"The origin and control of colour of white bentonites from the Aegean islands of Milos and Kimolos, Greece",* Mineralium Deposita 32(1997) 271-279.

[22] Grim R.E., Kulbicki G., *"Montmorillonite: High temperature reactions and classification",* American Mineralogist 46(1961) 1329-1369.

[23] Emmerich K., Wolters F., Kahr G., Lagaly G., *"Clay Profiling: The Classification of Montmorillonites",* Clays and Clay Minerals 57(2009) 104-114.

[24] Namayandeh A., Modabberi S., Ranjbaran M.,. *"Mineralogical and geochemical studiesto determine genesis of Khalkuh bentonite mine,Ferdows, SouthernKhorasan",* Petrology 6(2015) 19-34.

[25] Modabberi S., Namayandeh A., Setti M., López-Galindo A., *"Genesis of the Eastern Iranian bentonite deposits",* Applied Clay Science 168(2019) 56-67.

[26] Modabberi S., Namayandeh A., López-Galindo A., Viseras C., Setti M., Ranjbaran M., *"Characterization of Iranian bentonites to be used aspharmaceutical materials",* Applied Clay Science 116-117(2015) 193-201.

[27] Tarabi S., Modabberi S., *"Mineralogical investigation and water absorption of bentonites in Momen Abad area, to be used in pelletizing industry and a comparison with some other bentonite mines in Eastern Iranian Bentonite Zone",* Journal of Advance Applied Geology 10(2020) 407-420.

[28] Tarabi S., Modabberi S., Emami M.H., Sheikh Zakariaee S.J., *"Mineralogical and rheological characterization of bentonites in Momen Abad area, Eastern Iranian bentonite zone, to be Used in Drilling Industry",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 28(2020) 83-94.

[29] Shoja yami Gh., Ebrahimi Kh., Zarrinkoub M.H., *"Investigation of major, trace and rare earth elements variations in Esfezar bentonite deposit, east of Birjand, South Khorasan Province",* Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 27(2019) 83-94.

[30] Nakhaei M., *"Geochemistry and mineralogy of Khorasan bentonites and study their application in casting industry",* M.Sc Thesis, Ferdowsi

(editors), Palygorskite- Sepiolite Occurrences, Genesis and Uses, Developments in Sedimentology, (1984) pp. 87–124.

[10] Takagi T., Koh S. M., Song M. S., Itoh M., Mogi K., *"Geology and properties of the Kawasaki and Dobuyama bentonite deposits of Zao region in northeastern Japan",* Clay Minerals 40(2005) 333-350.

[11] WHO (World Health Organization), *"Bentonite, kaolin, and selected clay minerals", World health organization, international programme on chemical safety volume*", World Health Organization, Geneva, Switzerland, (2005) pp. 231.

[12] Christidis G.E., *"Physical and chemical properties of some bentonite deposits of Kimolos Island, Greece",* Applied Clay Science 13(1998) 79–98.

[13] Carretero M.I., Lagaly G., *"Clays and health: An introduction",* Applied Clay Science 36 (2007) 1–3.

[14] Harvey C.C., Lagaly, G., *"Conventional applications",* In: F Bergaya,. B.K.G. Theng G Lagaly, (editors), Handbook in Clay Science: Development in Clay Science. Elsevier, Amsterdam,(2006) pp. 501–541.

[15] Murray H.H., *"Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Application of Kaolins, bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays",* Development in Clay Science, 2. Elsevier, Amsterdam.(2007) 180 pp.

[16] Güven N., *"Bentonites—Clays for molecular engineering",* Elements 5 (2009) 89–92.

[17] Christidis G., Scott P.W., *"Laboratory evaluation of bentonites",* Industrial Minerals 311(1993)51–57.

[18] Bulut G., Chimeddorj M., Esenli F., Çelik M.S., *"Production of desiccants from Turkish bentonites"*, Applied Clay Science 46 (2009) 141–147.

[19] Sinha R., Raymahashay B.C., *"Evaporite mineralogy and geochemical evolution of the Sambhar Salt Lake, Rajasthan, India",* Sedimentary Geology 166(2004) 59–71.

[20] Miyoshi Y., Ishibashi J., Faure K., Maeto K., Matsukura S., Omura A., Shimada K., Sato H., Sakamoto T., Uehara S., Chiba H., Yamanaka T., *"Mg-rich clay mineral formation associated with marine shallow-water hydrothermal activity in an*

[40] Moraes D.S., Angélica R.S., Costa C.E.F., Rocha Filho G.N., Zamian J.R., *"Mineralogy and chemistry of a new bentonite occurrence in the eastern Amazonregion, northern Brazil",* Applied Clay Science 48(2010)475–480.

[41] Kadir S., Külahb T., Erkoyuna H., Uyanıka N.O., Erenc M., Elliott W.C., *"Mineralogy, geochemistry, and genesis of bentonites in Upper Cretaceous pyroclastics of the Bereketli member of the Res¸adiye Formation, Res¸adiye (Tokat), Turkey",* Applied Clay Science 204 (2021)106024.

[42] Kadir S., *"Mineralogy, geochemistry and genesis of smectite in Pliocenevolcaniclastic rocks of the Doğanbey formation, Beyşehir basin, Konya,Turkey",* Clays and Clay Minerals 55(2007) 402–422.

[43] Salduondo J., Comerio M., Cravero F., Etcheverry R., *"Mineralogical and geochemical analysis of sodium bentonites in continentalsettings: The Uspallata Group (Triassic) of the Cuyana Basin, Mendozaprovince, Argentina",* Journal of South American Earth Sciences 102(2020)102548.

[44] Siritongkham N., Srichan W., Khositanont S., Limtrakun P., *"Mineralogy, geochemistry and genesis of bentonite deposits in Lam Narai volcanic belts, Lop Buri province, central Thailan",* SN Applied Sciences 2(2020) 1-10.

[45] Christidis G.E., Scott P.W., *"The origin and control of colour of white bentonites from the Aegean Islands of Milos and Kimolos. Greece",* Mineral Deposita 32(1997)271-279.

[46] Christidis G. E., *"Validity of the structural formula method for layer charge determation of smectite: A re-evalution of published data",* Applied Clay Science42(2008) 1-7.

[47] Sakizci M., Alver B.E., Yörükoğullari E., *"Thermal behaviour and immersion heats of selected clays from Turkey",* Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 98(2009) 429-436.

[48] Bourliva A., Michailidis K., Sikalidis C., Filippidis A., *"Spectroscopic and thermal study of bentonites from Milos Island, Greece",* Bulletin of the Geological Society of Greece, Proceedings of the 13th International Congress 47(2013), 2020-2029.

[49] Wolters F., Emmerich K.,. *"Thermal reactions of smectites - relation of dehydroxylation temperature to octahedral structure",* Thermochimica Acta 462(2007) 80–88.

university of Mashhad, Mashhad, Iran (2002)145pp.

[31] Nakhaei M., Mohammadi S.S., Rasa I., Samiee S., *"Study of mineralogy, geochemistry and elemental behavior in the process of bentonites formation in Sarbisheh area (South Khorasan, east of Iran) "*, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy27(2019) 207-220.

[32] Nakhaei M., Barzgari Z., Mohammadi S.S., *"Investigation of using bentonite in removal of environmental pollutants: Eshkaftuk bentonite, northwest of Birjand)",*(2016) 23th symposium of Crystallography and Mineralogy of Iran, Damghan University, Damghan, Iran.

[33] Karimpour M. H., Stern C. R., Farmer L., Saadat S., Malekezadeh A., *"Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut block, Eastern Iran",* Geopersia 1 (2011)19-36.

[34] Ohanian T., Tatavosian S., *"Geological map of Birjand",* scale 1/100000, sheet7855, Geological Survey of Iran(1978).

[35] Whitney D., Evans, B., *"Abbreviations for names of rock-forming minerals",* American Mineralogist 95(2010) 185–187.

[36] Keller W.D., Reynolds R.C., Inoue A., *"Morphology of clay minerals in the smectite-to-illite conversation series by scanning electron microscopy",* Clays and Clay Minerals34 (1986) 187-197.

[37] Górniak K., Szydłak T., Gaweł A., Klimek A., Tomczyk A., Sulikowski B., Olejniczak Z., Motyka J., Serwicka E.M., Bahranowski K., *"Commercial bentonite from the Kopernica deposit (Tertiary, Slovakia): a petrographic and mineralogical approach",* Clay Minerals51(2016) 97-122.

[38] Fontaine F., Christidis G.E., Yans J., Hollanders S., Hoffman A., Fagel N., *"Characterization and origin of two Fe-rich bentonites from Westerwald (Germany)",* Applied Clay Science 187 (2020) 105444.

[39] Górniak K., Szydłak T., Gaweł A., Klimek A., Tomczyk A., Motyka J., Bahranowski K., *"Smectite-, silica-and zeolites-bearing raw materials (Hliník nad Hronom bentonite, Slovakia)-A new approach using integrated petrographic and mineralogical studies",* Applied Clay Science 141(2017)180-191.

[50] Senkayi A.L., Dixon J.B., Hossner L.R., Abder-Ruhman M., Fanning D.S., *"Mineralogy and genetic relationships of tonstein, bentonite, and lignitic strata in the Eocene Yegua formation of East-Central Texas",* Clays and Clay Minerals 32(1984) 259-271.

[51] Shiraki R., Sakai H., Endo M., Kishima N., *"Experimental studies on rhyolite- and andesite-seawater interactions at $300^{o}C$ and 1000 bars",* Geochemical Journal 21(1987) 139-148.

[52] Altaner S.P., Grim R.E., *"Mineralogy, chemistry and diagenesis of tuffs in the Sucker Creek Formation (Miocene), Eastern Oregon",* Clays and Clay Minerals 38(1990) 561-572.

[53] Arslan M., Abdioglu E., Kadir S., *"Mineralogy, Geochemistry, and origin of bentonite in Upper Cretaceous pyroclastic units of the Tirebolu area, Giresun, northeast Turkey",* Clays and Clay Minerals 58 (2010) 120–141.

[54] Winchester J. A., Floyd P. A., *"Geochemical classification of different magma series and their differentiation products using immobile elements",* Chemical Geology 20(1977) 325-343.

[55] Hastie A. R., Kerr A. C., Pearce J. A., Mitchell S. F., *"Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th–Co discrimination diagram",* Journal of petrology 48((2007) 2341-2357.

[56] Sun S.S., McDonough W.F., *"Chemical and isotopic systematic of ocean basalts: implications for mantle composition and process",* In: A.D. Saunders and M.J. Norry (Editors), Magmatism in the ocean basins. Special Publication42, Geological Society, London,(1989) pp. 313–345.

[57] Boynton W.V., *"Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies",* In: P. Henderson, (editor), Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier Science Publishing Company,New York,(1984) pp. 63-114.

[58] Yang W., Li, S., *"Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: Implications for lithospheric thinning of the North China Craton",* Lithos 102(2008) 88–117.

[59] Kuscu G.G., Geneli F., *"Review of post-collisional volcanism in the central Anatolian volcanic province (Turkey), with special reference to the Tepekoy volcanic complex",* International Journal of Earth Sciences 99(2010) 593-621.

[60] Arslan M., Aslan Z., *"Mineralogy, Petrography and whole- rock geochemistry of the Tertiary granitic intrusions in the Eastern Pontides, Turkey",* Journal of Asian Earth Sciences 27(2006) 177-193.

[61] Tatsumi Y., Hamilton D.L.,Nesbitt R.W., *"Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: Evidence from high pressure experiments and natural rocks",* Journal of Volcanology and Geothermal Research 29(1986) 293-309.

[62] MacDonald R., Hawakesworth C.J., Heath J., *"The lesser Antilles volcanic Chine: a study in arc magmatism",* Earth Science Review 49(2000) 1-76.

[63] Winter J.D., *"An introduction to Igneous and metamorphic petrology",* Prentice Hall New Jersey(2001) 796pp.

[64] Le Maitre R. W., Streckeisen A., Zanettin B., Le Bas M. J., Bonin B.,Bateman P., *" Igneous rocks: a classification and glossary of terms: recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks",* Cambridge University Press (2005).

[65] Siddiqu R. H., Asif Khan M., Qasim Jan M., *"Geochemistry and petrogenesis of the Miocene alkaline and sub-alkaline volcanic rocks from the Chagai arc, Baluchistan, Pakistan: Implications for porphyry Cu-Mo-Au deposits",* Journal of Himalayan Earth Sciences 40(2007) 1-23.

[66] Christidis G.E., *"Comparative study of the mobility of major and trace elements during alteration of an ndesite and a rhyolite to bentonite , in the islands of Milos and Kimolos, Aegean, Greece",* Clays and Clay Minerals 46(1998) 379-399.

[67] Maclean W., *"Mass change calculations in altered rock series",* Mineralium Deposita 25 (1990) 44-49

[68] Nesbitt H. W., Wilson R. E., *"Recent chemical weathering of basalts",* American Journal of science 292 (1992) 740-777.

[69] Brimhall G.H., Chadwick O.A., Lewis C.J., Compston W., Williams I.S., Danti K.J., Dietrich W.E., Power M.E., Hendricks D., Bratt J., *"Deformational mass transport and invasive processes in soil evolution",* Science 255 (1992) 695-702.

formation. Colorado. U.S.A.", Chemical geology 35 (1982) 185-204.

[74] Malek Mahmoudi F., Khalili M., *"The behavior of elements in the process of alteration of andesite-basalt to bentonite in Tashtab Mountain, Khur, northeastern Isfahan province",* Journal of Economic Geology 4(2012) 109-121.

[75] Fulignati P., Gioncada A., Sbrana A., *"Rare earth element (REE) behavior in the alteration facies of the active magmatic-hydrothermal system of Volcano (Aeolian Islands, Italy)",* Journal of Volcanology and Geothermal Research 88 (1999) 325-342.

[70] Gresens R.L., *"Composition –volume relationships of metasomatism",* Chemical Geology 2 (1967) 47-55.

[71] Grim R.E., Güven N., *"Bentonites, Geology, Mineralogy, Properties and Uses, Development in Sedimentology",* Elsevier 24 (2011) 256.

[72] Grant J., *"The isocone diagram –A simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration",* Economic geology 81 (1986) 1976-1982.

[73] Zielinski R.A., *"The mobility of uranium and other elements during alteration of rhyolite ash to mintmorillonite: a case study in the troublesome*